



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenl gungsschrift**
⑩ **DE 198 58 621 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁷:
G 01 P 15/14
G 01 P 15/08
G 01 P 21/00

②1 Aktenzeichen: 198 58 621.3
②2 Anmeldetag: 18. 12. 1998
④3 Offenlegungstag: 6. 7. 2000

DE 198 58 621 A 1

⑦1 Anmelder:
Autoflug GmbH & Co, 25462 Rellingen, DE

⑦4 Vertreter:
Becker und Kollegen, 40878 Ratingen

⑦2 Erfinder:
Drücke, Peter, Dr., 28307 Bremen, DE; Hinsch,
Thomas, Dipl.-Ing., 28870 Ottersberg, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren zum Verbessern der Meßwerte eines inertialen Meßsystems

⑤7 Inertiale Meßsysteme zum Messen von Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten werden derzeit vielseitig in Fahrzeugen verwendet und dienen dort als Sensoren für Sicherheitseinrichtungen und Navigationssysteme. Die erforderliche Zuverlässigkeit und Präzision ist jedoch nur mit hochgenauen Sensoren und präziser Fertigung zu realisieren. Es wird deshalb ein Verfahren angegeben, mit dem ein inertiales Meßsystem mit preiswerten Sensoren aus Massenfertigung zunächst auf einer Prüfeinrichtung in einem Justiervorgang insgesamt vermessen wird. Dabei werden die Offset-, Einbaulage- und Skalierungsfehler in Koeffizienten von Kopplungsmatrizen der Sensoren erfaßt und in Korrekturwerte umgerechnet, die dann beim Betriebseinsatz des Meßsystems zur Verbesserung der Genauigkeit der Meßwerte der Sensoren benutzt werden. Das Verfahren ist für inertielle Meßsysteme in Land-, Luft- und Wasserfahrzeugen anwendbar.

DE 198 58 621 A 1

FB

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern von Meßwerten eines inertialen Meßsystems nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Derartigen Verfahren werden in inertialen Meßsystemen angewendet, die derzeit ein weitverbreitetes Anwendungsgebiet erfahren. So finden sie bei Regelungs- und Steuerungssystemen Anwendung, in denen eine genaue Kenntnis von Beschleunigung und Winkelgeschwindigkeit in bezug auf ein inertiales Koordinatensystem (Fixsternsystem) notwendig ist. Üblicherweise wird als inertiales Bezugssystem das erdfeste System in erster Näherung benutzt. Einerseits werden solche, auch als Inertiale-Plattform bezeichnete Meßsysteme in technisch sehr aufwendigen Systemen bei der Ausrichtung und Regelung von Waffen benutzt oder kommen bei der Neigeregelung von Hochgeschwindigkeitszügen zur Anwendung. Andererseits werden solche Systeme dann schon bald zu einem Massenartikel, wenn Kraftfahrzeuge in immer stärkerem Maße mit Airbags und Seitenaufprallschutz aber auch mit Roll- und Gierstabilisatoren oder Navigationssystemen ausgestattet werden und derartige Systeme zum Auslösen und Regeln dieser Sicherheitseinrichtungen Verwendung finden. Eben solche Einrichtungen werden auch in der Luftfahrtindustrie und der Marinetechnik benötigt.

So ist aus der deutschen Offenlegungsschrift 44 16 586 ein Meßsystem mit Winkelgeschwindigkeits- und Beschleunigungssensoren und einer Rechneinheit bekannt, in dem die Meßwerte der Sensoren zu Ausgangswerten umgerechnet werden, die auf ein inertiales Koordinatensystem bezogen sind.

Die derzeit für diese Meßsysteme verfügbaren Sensoren sind, wenn sie über das erforderliche Maß an Zuverlässigkeit und Präzision verfügen, noch recht kostspielig. Zwar können inzwischen Sensoren, wie Kreisel und Beschleunigungsmesser als Mikroelektronik-Bauelemente preiswert gefertigt werden, jedoch weisen sie im eingebauten Zustand erhebliche Fehler auf, so daß für den Aufbau der Meßsysteme ein erheblicher Fertigungsaufwand einschließlich der erforderlichen Justier- und Kompensationsarbeiten notwendig ist, um zulässige Fehler- und Offsettoleranzen zu erreichen.

Es ist deshalb Aufgabe der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zur Verbesserung der Meßwerte anzugeben, bei dem ein mit preiswerten Sensoren für Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen aufgebautes Meßsystem auf einfache Weise justiert und kompensiert werden kann.

Diese Aufgabe wird durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

Das erfindungsgemäße Verfahren ist besonders vorteilhaft in der Fertigung von Massenprodukten einzusetzen, da es nur geringen personellen Aufwand für die Einrichtung des Meßsystems und der Prüfeinrichtung erfordert. Aufwendige mechanische Justierarbeiten entfallen ebenso wie die dafür erforderlichen Justiervorrichtungen und Hilfsmittel. Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich sehr gut für eine vollautomatische, ökonomische Fertigungsprüfung inertialer Meßsysteme, da es die Verwendung einfacher, kostengünstig zu fertigender Sensoren für Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen ermöglicht und deren Fertigungstoleranzen in der Justierung oder Eichung des Meßsystems berücksichtigt, so daß damit die Genauigkeit des inertialen Meßsystems entscheidend verbessert wird.

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Eichung oder Justierung der Sensoren ist die Verfügbarkeit von Eichnormalen mit großer Präzision, d. h. hohe Genauigkeit der absoluten Werte für Winkelgeschwindigkeit und Beschleunigung sowie optimale Reproduzierbarkeit von Anregung und Winkellage. Hierzu wird das Meßsystem auf einem Präzisions-Drehtisch montiert, dessen Drehachse genau horizontal ausgerichtet ist. Die Montage erfolgt so, daß Koordinatenachsen des Meßsystems und des Drehtischs parallel verlaufen, Parallelverschiebungen sind unerheblich für das Ergebnis. Damit kann das Meßsystem auf einfache Weise zwei Referenz-Anregungen ausgesetzt werden. Eine dynamischen Anregung der Kreisel durch präzise, konstante Drehbewegung und eine statischen Anregung der Beschleunigungsmesser durch die Erdbeschleunigung sind auf diese Weise einfach zu realisieren.

Das erfindungsgemäße Verfahren wird auch durch die Unteransprüche vorteilhaft weitergebildet.

Dabei hat es sich für einen optimalen Prüfablauf als vorteilhaft erwiesen, der Vermessung auf dem Drehtisch eine Messung der Winkelgeschwindigkeitsoffsets der Kreisel und der Beschleunigungsoffsets der Beschleunigungsmesser in Abhängigkeit von der Temperatur voranzustellen, da diese Messungen im allgemeinen einen hohen Zeitbedarf haben. Die Erfindung wird im folgenden anhand eines in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiels näher beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 eine Prinzipskizze der Prüfeinrichtung mit einem Meßsystem,

Fig. 2 ein Blockschaltbild eines Meßsystems,

Fig. 3 ein Funktionsdiagramm des Meßsystems.

Für das erfindungsgemäße Verfahren wird, wie in Fig. 1 dargestellt, ein Präzisionsdrehtisch 1 mit einer um mindestens eine Achse drehbaren Montagefläche 2 verwendet, auf der das inertielle Meßsystem 10 montiert ist. Zur Steuerung des Meßablaufs sind der Drehtisch 1 über ein Steuerkabel 7 und das Meßsystem 10 über ein Steuer- und Versorgungskabel 6 mit einem Computer 5 verbunden. Dabei dient die mit dem Versorgungskabel 6 verbundene Schnittstelle 11 des Meßsystems 10 nicht nur der Zuführung für die Stromversorgung sondern auch zur Datenübertragung für Steuerbefehle zum Aktivieren von Justier- und Normalmodus des Meßsystems 10.

Das eingezeichnete Koordinatensystem x,y,z stimmt mit den Körperachsen des Meßsystems 10 überein, nach denen auch die Sensoren des Meßsystems 10, die Beschleunigungsmesser und Winkelgeschwindigkeitssensoren, i. a. Kreisel, ausgerichtet sind. Dabei ist die in die Zeichenebene weisende x-Achse oder Längsachse des Meßsystems 10 parallel zur Drehachse und auf die Montagefläche 2 hin ausgerichtet. Die Drehung im mathematisch positiven Sinn um die x-Achse erfolgt daher in Richtung des Pfeils 8. Die y-Koordinate entspricht der Querachse und die z-Koordinate der Vertikalachse des Meßsystems 10.

Zur Ermittlung der Justierdaten müssen alle Sensoren des Meßsystems 10 eine genau vorgegebene Anregung erfahren. Zur Anregung der Beschleunigungsmesser ist dabei die Erdbeschleunigung $g = 9,80665 \text{ m/sec}^2$ vorgesehen. In der dargestellten Lage des Meßsystems 10 wirkt die Erdbeschleunigung g in Richtung der z-Achse. Um die Wirkungsrichtung für die y-Achse zu aktivieren muß dann das Meßsystem exakt um 90° gedreht werden. Durch eine weitere 90° -Drehung ist die Anregung der Beschleunigungsmesser in negativer z-Richtung zu erzielen und die dritte 90° -Drehung ermöglicht die Anregung in der negativen y-Koordinatenachse. In dieser Montagelage wird ferner durch eine konstante,

gleichförmige Drehung um einen vorgegebenen Winkelbereich der die Winkelgeschwindigkeit messende Kreisel in der x-Achse angeregt.

Zur Messung der Beschleunigung in Richtung der x-Koordinate ist das Meßsystem 10 umzumontieren, so daß die x-Achse vertikal und mit dem Gravitationsvektor g parallel verläuft. In dieser Montagelage zeigt die y-Achse auf den Drehteller, so daß der auf die y-Achse ausgerichtete Kreisel dynamisch vermessen werden kann. Für die Vermessung des Kreisels in der z-Achse ist eine weitere Änderung der Montage vorzunehmen und die z-Achse zum Drehtisch hin auszurichten.

Das Meßsystem ist bei einer Prüfvorrichtung gemäß Fig. 1, die eine Montagefläche 2 mit nur einer Drehachse aufweist, mehrfach zu montieren. Dabei stellen die Gehäuseflächen die jeweiligen Bezugsflächen dar und erfordern eine streng orthogonale Fertigung. Da jedoch auch in der späteren Gebrauchslage des Meßsystems 10 die Bezugsflächen durch die Gehäuseflächen gebildet werden, ergibt sich hieraus keine Beeinträchtigung der Präzision.

Der grundsätzliche Aufbau des Meßsystems 10 ergibt sich aus Fig. 2. Das Meßsystem 10 weist eine Rechneinheit 12 mit integriertem Speicher 14 für Daten und Programme auf und ist über die Schnittstelle 11 mit dem Computer 5 verbunden.

Die Rechneinheit 12 ist weiterhin mit einer Signalvorverarbeitung 16, einem Inertialwertrechner 50 und einer Datenausgabe 60 verbunden und steuert durch im Speicher 14 abgelegte Programme die interne Datenverarbeitung des Meßsystems 10. In der Signalvorverarbeitung 16 werden die von einer Sensoreinheit 15 gemessenen Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen in einer Justierung 20 und einer Kompensation 40 abhängig von Justier- oder Normalmodus zur Weiterverarbeitung im Inertialwertrechner 50 aufbereitet.

In Fig. 3 sind die grundsätzlichen Funktionen des erfindungsgemäßen Meßsystems 10 in einem Funktionsdiagramm dargestellt. Die von der Sensoreinheit 15 aufgenommenen Sensordaten, Winkelgeschwindigkeit, Beschleunigung und Temperatur, werden über den Datenbus 16 entweder der Justierung 20 oder der Kompensation 40 zugeführt. Die Auswahl der jeweiligen Funktion erfolgt von außen über die Schnittstelle 11 in Fig. 1 durch den Steuerrechner 5. Die nachfolgenden Verfahrensschritte werden dann durch die Rechneinheit 12 programmgesteuert ausgelöst. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist auf die Wirkungslinien von der Rechneinheit 12 zu den Funktionsblöcken der Fig. 3 verzichtet worden.

Die von den Sensoren aufgenommenen Meßwerte von Beschleunigung und Winkelgeschwindigkeit sind grundsätzlich fehlerbehaftet. Dabei wird zwischen Offset-, Einbaulage- oder Skalierungsfehlern unterschieden. Sensoren die inzwischen als Mikroelektronik-Bauelemente in großer Stückzahl hergestellt werden können, müssen bei der Integration zu vollständigen Meßsystemen mit guter Genauigkeit justiert und auf die Koordinatenachsen x,y,z des Meßsystems 10 ausgerichtet werden. Die genannten Fehler gehen dabei zwar unmittelbar in die Meßergebnisse ein, werden aber in dem erfindungsgemäßen Verfahren durch Referenzmessung im Fertigungstest bestimmt und im Betriebsgebrauch kompensiert. Dazu ist es erforderlich, wie in Fig. 3 dargestellt, die Sensordaten der Beschleunigungsmesser und Kreisel für jede Koordinatenachse x,y,z des Meßsystems 10 getrennt zu erfassen und zu verarbeiten.

Die Sensoreinheit 15 weist für jede Koordinatenachse x,y,z je einen Beschleunigungsmesser für die Beschleunigungen a_x, a_y, a_z und je einen Kreisel für die Winkelgeschwindigkeit $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ auf. Als Referenz für die Beschleunigungsmesser wird die Gravitation oder Erdbeschleunigung $g = 9.80665 \text{ m/sec}^2$ benutzt. Dabei ist jedoch zu beachten, daß der Beschleunigungssensor, der der Koordinatenachse des Meßsystems 10 zugeordnet ist, die jeweils in Richtung des Gravitationsvektors weist, den negativen Betrag der Erdbeschleunigung mißt.

Zur Ermittlung der Justierdaten der Beschleunigungsmesser werden die Beschleunigungswerte a_{nx}, a_{ny}, a_{nz} von der Sensoreinheit 15 zur Justierung 20 übertragen, wobei mit dem Index n der Meßzyklus und mit den Indizes x,y,z die Koordinatenachsenzuordnung gekennzeichnet ist. In einer Beschleunigungs-Datenerfassung 31 (B-Datenerfassung 31) wird zur Rauschreduzierung eine Anzahl von Beschleunigungswerten a_{nx}, a_{ny}, a_{nz} für jede Koordinate übernommen und für z. B. typisch 2000 Messungen gemittelt. Es sind mehrere Meßzyklen derart durchzuführen, daß das Meßsystem 10 mit seinen Koordinatenachsen in Richtung des Gravitationsvektors g oder in die inverse Richtung gedreht wird. Dabei werden jedoch stets die Meßwerte aller Beschleunigungssensoren an die B-Datenerfassung 31 übertragen. D. h. ausgehend von Fig. 1 stimmt zunächst die z-Achse mit dem Gravitationsvektor g überein, so daß die Beschleunigung a_{1z} sowie a_{1x}, a_{1y} an die B-Datenerfassung 31 übertragen werden. Der Drehteller 2 wird um genau 90° gemäß Pfeil 8 gedreht und damit die y-Achse auf den Gravitationsvektor g ausgerichtet, so daß die Beschleunigungswerte a_{3y} sowie a_{3x}, a_{3z} erfaßt werden. Eine weitere Drehung um 90° bewirkt eine Anregung des Beschleunigungsmessers in der z-Achse und somit die Erfassung der Beschleunigung a_{2z} sowie a_{2x}, a_{2y} . Die dritten Drehung um 90° hat eine Anregung in der negativen y-Koordinatenachse und die Beschleunigung a_{4y} sowie a_{4x}, a_{4z} zur Folge, die ebenfalls an die B-Datenerfassung 31 übertragen werden. Zur Vermessung des Beschleunigungssensors der x-Achse muß das Meßsystem ummontiert werden, so daß die Beschleunigung a_{5x} sowie a_{5y}, a_{5z} gemessen und erfaßt werden. Die Beschleunigungen a_{6x} sowie a_{6y}, a_{6z} werden durch Umschlagen, d. h. zweimalige 90° -Drehung und Einwirkung des Gravitationsvektors auf den Beschleunigungsmesser in der x-Achse erhalten. Der Beschleunigungsoffset $\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$ jedes Beschleunigungssensors errechnet sich nun jeweils aus den Beschleunigungen a_1, a_3, a_5 bei Ausrichtung in Richtung des Gravitationsvektors g und den Beschleunigungen a_2, a_4, a_6 bei Ausrichtung entgegen der Richtung des Gravitationsvektors zu

$$\begin{aligned}\Delta a_x &= \frac{a_{5x} + a_{6x}}{2}, \\ \Delta a_y &= \frac{a_{3y} + a_{4y}}{2}, \\ \Delta a_z &= \frac{a_{1z} + a_{2z}}{2}.\end{aligned}\quad (1)$$

Zwischen den Beschleunigungssensoren in den Koordinatenachsen x,y,z bestehen Kreuzkopplungen, die zur Folge haben, daß eine Beschleunigungsanregung nur dann genau in einer Achse wirkt, wenn alle Beschleunigungssensoren

ohne Einbaufehler exakt orthogonal ausgerichtet sind. Ist das nicht der Fall hat die Beschleunigungsanregung auch Meßwerte an den beiden anderen Beschleunigungssensoren zur Folge. Die Meßwerte sind darüberhinaus durch die Meßverstärkung jedes Sensors beeinflusst. Die Abhängigkeit der Meßwerte a_{nx} , a_{ny} , a_{nz} von den Anregungen a_x , a_y , a_z und den Beschleunigungsoffsets Δa_x , Δa_y , Δa_z ist allgemein durch ein Gleichungssystem gemäß Gleichung 2 in Matrixform beschrieben

$$\begin{pmatrix} a_{nx} \\ a_{ny} \\ a_{nz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta a_x \\ \Delta a_y \\ \Delta a_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

und ist in Kurzform durch die Gleichung 3 darzustellen

$$(A_n) = (K) \cdot (A) + (\Delta A) \quad (3),$$

wobei die Kopplungsmatrix K mit den Koeffizienten k_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) die Einbaulageabweichungen und Skalierungsfehler, d. h. Verstärkungsfehler, beinhaltet.

Aus den in der B-Datenerfassung 31 vorliegenden Beschleunigungswerten a_{nx} , a_{ny} , a_{nz} , den Beschleunigungsoffsets Δa_x , Δa_y , Δa_z und den bekannten Referenzanregungen durch die Erdbeschleunigung g , wobei die Anregungsvektoren bei Ausrichtung der jeweiligen Koordinatenachse auf den Gravitationsvektor die Werte

$$x\text{-Achse: } (A) = \begin{pmatrix} -g \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad y\text{-Achse: } (A) = \begin{pmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad z\text{-Achse: } (A) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix}$$

haben, werden in einem B-Drehmatrixrechner 32 die Koeffizienten k_{ij} der Dreh- oder Koppelmatrix K errechnet. Außerdem wird die zur Koppelmatrix inverse Matrix K^{-1} mit den Korrekturwerten K_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$), Gleichung 4, gebildet

$$K^{-1} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} \quad (4),$$

die zur Kompensation der während des Betriebs des Meßsystems 10 im Normalmodus anfallenden Meßwerte im B-Matrix-Speicher 33 abgelegt wird.

Die Bestimmung der Justierdaten der Kreisel erfolgt in einer ähnlichen Art und Weise wie für die Beschleunigungsmesser. Als Referenz im statischen Ruhezustand der Kreisel und für die dynamische Anregung dient der Drehteller 2 des Präzisionsdrehtisches 1. Dabei sind die drei Koordinatenachsen x, y, z des Meßsystems 10 nacheinander auf die Drehachse des Drehtisches 1 ausgerichtet, was bei einem Drehtisch 1 gemäß Fig. 1, der eine Drehbewegung um nur eine Achse zuläßt durch Ummontieren erfolgen muß.

Zunächst werden im Ruhezustand des Drehtisches 1 die Winkelgeschwindigkeiten ω_{0x} , ω_{0y} , ω_{0z} der Winkelgeschwindigkeitssensoren gemessen. Als Winkelgeschwindigkeitssensoren sind in der Sensoreinheit 15 für jede Koordinatenachse x, y, z des Meßsystem 10 je ein Kreisel vorgesehen. Die Meßwerte ω_{0x} , ω_{0y} , ω_{0z} dieser Kreisel werden über den Datenbus 16 von der ω -Offsetterfassung 21 übernommen und zwischengespeichert. Dann wird der Drehtisch 1 angetrieben und das Meßsystem 10 um die mit der Drehachse des Drehtisches 1 übereinstimmende Koordinatenachse x des Meßsystems 10 mit konstanter, genau definierter Winkelgeschwindigkeit $\omega = 70^\circ/\text{sec}$ gedreht. Die vorgegebene Winkelgeschwindigkeit ω_x wird zumindest über einen begrenzten Drehwinkelbereich exakt konstantgehalten, da diese Winkelgeschwindigkeit ω_x die Referenz für die Ermittlung der Kreiselkorrekturdaten bildet. Die Meßwerte ω_{1x} , ω_{1y} , ω_{1z} aller drei Kreisel werden in der ω -Datenerfassung 22 in der verfügbaren Meßzeit mehrfach gemessen, gemittelt und zwischengespeichert. Wenn nach den beiden Montageänderungen auch die ω -Offsets bei Ausrichtung auf die beiden anderen Koordinatenachsen y, z in der ω -Offsetterfassung 21 und die Winkelgeschwindigkeitsmesswerte ω_{nx} , ω_{ny} , ω_{nz} ($n = 2, 3$) in der ω -Datenerfassung 22 vorliegen, werden im ω -Drehmatrixrechner 23 die Winkelgeschwindigkeitswerte ω_{nx} , ω_{ny} , ω_{nz} ($n = 1, 2, 3$) um die Offsets ω_{0x} , ω_{0y} , ω_{0z} bereinigt und die Drehmatrix K_ω mit den Koeffizienten k_{ij}^* gemäß Gleichung 5

$$\begin{pmatrix} \omega_{nx} \\ \omega_{ny} \\ \omega_{nz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11}^* & k_{12}^* & k_{13}^* \\ k_{21}^* & k_{22}^* & k_{23}^* \\ k_{31}^* & k_{32}^* & k_{33}^* \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{0x} \\ \omega_{0y} \\ \omega_{0z} \end{pmatrix} \quad (5)$$

berechnet. Auch für die Winkelgeschwindigkeiten wird die inverse Matrix K_ω^{-1} gebildet und als Korrekturmatrix mit den Korrekturwerten (Koeffizienten) K_{ij}^* ($i, j = 1, 2, 3$) im ω -Matrix-Speicher 23 abgelegt.

Im realen Prüfbetrieb für derartige Meßsysteme 10 wird der Meßprogrammablauf hinsichtlich der Montageveränderungen optimiert. Von der hier zur geschlossenen Darstellung von Winkelgeschwindigkeits- und Beschleunigungsmessungen vorgezogenen Abfolge wird dann insofern abgewichen, als in jeder Montigelage des Meßsystems 10 alle erforderlichen Winkelgeschwindigkeits- und Beschleunigungsmessungen unabhängig von der vorher beschriebenen Abfolge durchgeführt und nach Beendigung aller Messungen die Drehmatrizen in den Drehmatrixrechnern 23 und 24 ermittelt werden.

Die Kreisel und Beschleunigungssensoren sind im allgemeinen temperaturempfindlich. Daher ist bei der Justierung 20 eine Offsets erfassung in Abhängigkeit von der Temperatur vorgesehen. Temperaturzyklen haben in der Regel einen sehr hohen Zeitbedarf, damit Ausgleichvorgänge bei Temperaturänderung abklingen können. Für die temperaturabhängigen Messungen verbleibt das Meßsystem 10 in einer definierten Ruhelage ohne die geringste Erschütterung. Dabei werden mit dem Temperaturwert ϑ des Temperatursensor in der Sensoreinheit 15 die Meßwerte der Kreisel $\omega_x(\vartheta)$, $\omega_y(\vartheta)$, $\omega_z(\vartheta)$ 5 an die temperaturabhängige ω -Offsets erfassung 25 und die Meßwerte der Beschleunigungssensoren $a_x(\vartheta)$, $a_y(\vartheta)$, $a_z(\vartheta)$ an die temperaturabhängige B-Datenerfassung 34 übertragen. Nach einer Mittelwertbildung über eine Vielzahl von Meßdaten bei der jeweils gleichen Temperatur ϑ werden die ω -Offsets in einer ω -Temperatur-Tabelle 27 gespeichert. Auch die Beschleunigungswerte $a_x(\vartheta)$, $a_y(\vartheta)$, $a_z(\vartheta)$ werden gemittelt und als relative Beschleunigungswerte in einer B-Temperatur-Tabelle 35 zwischengespeichert. Die relative Beschleunigungswerte der B-Temperatur-Tabelle 35 werden anschließend in einer B-Offsetrechnung 36 mit den in der B-Datenerfassung 31 ermittelten absoluten Beschleunigungswerten zu einem Beschleunigungsoffset korrigiert und in der B-Offset-Temperatur-Tabelle 37 gespeichert.

Nach der programmgesteuerten Umschaltung des Meßsystems 10 in den Normalmodus werden die Meßwerte der Sensoreinheit 15, d. h. die Beschleunigungen a_{nx} , a_{ny} , a_{nz} , die Winkelgeschwindigkeiten ω_{nx} , ω_{ny} , ω_{nz} und die Temperatur ϑ , über den Datenbus 16 an die Kompensation 40 übertragen. In der Kompensation 40 erfolgt entsprechend der Temperatur ϑ zunächst die Offsetkorrektur der Winkelgeschwindigkeit ω_{nx} , ω_{ny} , ω_{nz} mit den Werten der ω -Temperatur-Tabelle 27 in einer ca-Summierstufe 41. Ebenso werden die Beschleunigungswerte a_{nx} , a_{ny} , a_{nz} in der B-Summierstufe 42 mit temperaturabhängigen Beschleunigungsoffsets der B-Temperatur-Tabelle 37 korrigiert. Die Ausgangswerte der Summierstufen 41 und 42 stellen damit die um Offsets bereinigten Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen dar, deren Einbaulage- und Skalierungsfehler mit den Kompensationsmatrizen aus dem ω -Matrix-Speicher 24 und dem B-Matrix-Speicher 33 in einer Kompensationsrechnung 45 optimiert werden. Die derart kompensierten und optimierten Meßwerte werden in einem Inertialwertrechner 50 mit dem bekannten Euler-Transformationsverfahren in Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen eines inertialen Bezugssystems umgerechnet und in einer Datenausgabe 60 bereitgestellt. Sie geben die Bewegung des Meßsystems 10 bzw. die Bewegung der mit diesem Meßsystem 10 verbundenen Anlage in diesem inertialen Bezugssystem an.

In einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens werden regelmäßig mehr Meßwerte für Beschleunigung a_{nx} , a_{ny} , a_{nz} und Winkelgeschwindigkeit ω_{nx} , ω_{ny} , ω_{nz} von der Sensoreinheit 15 in Fig. 2 erfaßt, als für die Berechnung der Kopplungsmatrizen K und K_ω erforderlich ist. Dabei kann das Meßsystem 10 dann auch von der Lotrichtung abweichende Winkellagen einnehmen. Da die Koeffizienten der Kopplungsmatrizen K und K_ω linear unabhängig sind, werden die durch Gleichungen 2 und 5 beschriebenen Matrixgleichungen entsprechend der Zahl der Meßergebnisse erweitert und die Dreh- oder Koppelmatrizen K, K_ω bzw. die dazu inversen Matrizen K^{-1} , K_ω^{-1} in einem in der Recheneinheit 12 implementierten, bekannten Regressionsrechenverfahren ermittelt.

In Abwandlung des beschriebenen Ausführungsbeispiels kann die Justierung des Meßsystems 10 dann ohne Ummonitoren erfolgen, wenn statt eines einachsigen Drehtisches 1 ein Präzisions-Drehtisch mit einer um drei Koordinatenachsen drehbaren Montagefläche verwendet wird. Eine solche Lösung ist für einen praktischen, automatischen Prüfbetrieb von Vorteil, ohne jedoch die Qualität der Justierung weiter zu verbessern.

Eine weitere Modifikation des Meßverfahrens ergibt sich für ein vergleichbares Meßsystem bei einer reduzierten Anzahl von Sensoren. Denn das Verfahren ist ebenso zur Justierung und Kompensation geeignet, wenn ein Meßsystem lediglich aus ein oder zwei Sensoren, seien es Kreisel oder Beschleunigungsmesser, besteht. Dazu hat dann eine Anpassung des Meßablaufs sowie die Reduzierung der Kompensationsmatrizen und Speicherfunktionen zu erfolgen, die dem mit diesen Verfahren vertrauten Fachmann leicht möglich sind.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Verbessern der Meßwerte eines inertialen Meßsystems (10), das eine Rechereinheit (12) zur Koordinatentransformation und Sensoren für Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten aufweist, die in einem den orthogonalen Achsen des Meßsystems (10) zugeordneten Koordinatensystem gemessen und derart transformiert werden, daß die Ausgangswerte in einem Inertialsystem bereitgestellt werden, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Meßwerte der Sensoren mit in einem Justiermodus gewonnenen Korrekturwerten kompensiert werden und daß in dem Justiermodus das Meßsystem (10) auf einer Prüfeinrichtung (1), die eine um mindestens eine Koordinatenachse drehbare Montagefläche (2) aufweist, derart montiert wird, daß orthogonale Koordinatenachsen x,y,z von Prüfeinrichtung (1) und Meßsystem (10) parallel verlaufen, daß aufeinanderfolgend jede Koordinatenachse x,y,z des Meßsystems (10) einerseits in Lotrichtung und in die jeweils inverse Lotrichtung und andererseits in Drehachsenrichtung der Prüfeinrichtung (1) ausgerichtet wird, daß für jede Ausrichtung des Meßsystems (10) die Meßwerte der Sensoren erfaßt werden, daß aus den Meßwerten unter Berücksichtigung eines linearen Gleichungssystems für die Kreuzkopplungen der Sensoren die Korrekturwerte berechnet und in einem Speicher (24, 33) abgespeichert werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß im Ruhezustand des Meßsystems (10) die Meßwerte der Winkelgeschwindigkeitssensoren jeweils als Winkelgeschwindigkeitsoffset (ω_{0x} , ω_{0y} , ω_{0z}) erfaßt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßsystem (10) um die auf die Drehachse ausgerichtete Koordinatenachse mit konstanter Winkelgeschwindigkeit gedreht wird, die Meßwerte (ω_{nx} , ω_{ny} , ω_{nz}) der Winkelgeschwindigkeitssensoren fortlaufend erfaßt werden und daß aus den Winkelgeschwindigkeiten (ω_{nx} , ω_{ny} , ω_{nz}) und den Winkelgeschwindigkeitsoffsets (ω_{0x} , ω_{0y} , ω_{0z}) die Korrekturwerte als Koeffizienten (K_{ij}^{-1}) einer Kompensationsmatrix (K_ω^{-1}) der Winkelgeschwindigkeiten berechnet werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß jeweils für den mit der Lotrichtung übereinstimmenden Beschleunigungssensor mit der Erdbeschleunigung g als Referenz aus den Meßwerten des Beschleunigungssensors in der Lotrichtung und in der dazu inversen Lotrichtung ein Beschleunigungsoffset (Δa_x , Δa_y , Δa_z) durch Mittelung berechnet wird und daß mit den den Koordinatenachsen zugeordneten Meßwerten (a_{nx} , a_{ny} , a_{nz})

a_{nz}) und den Beschleunigungsoffsets (Δa_x , Δa_y , Δa_z) die Korrekturwerte als Koeffizienten (K_{ij}) einer Kompensationsmatrix (K^{-1}) der Beschleunigungen berechnet werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 und 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Kompensationsmatrizen (K_ω^{-1} , K^{-1}) im Speicher abgelegt werden.

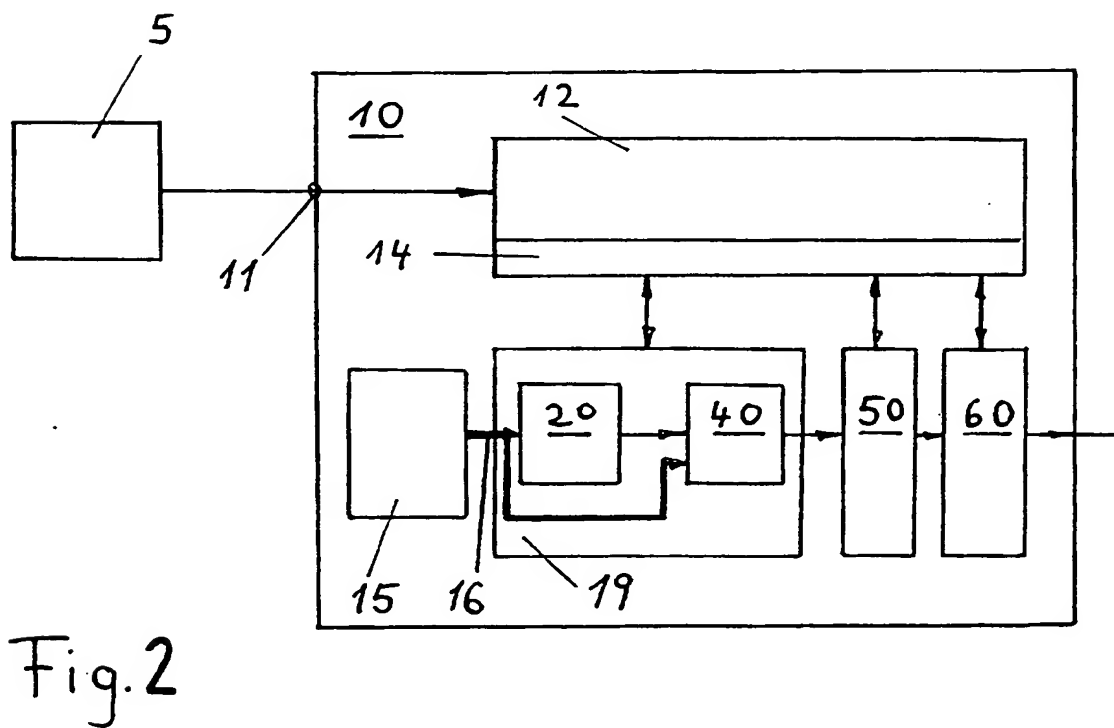
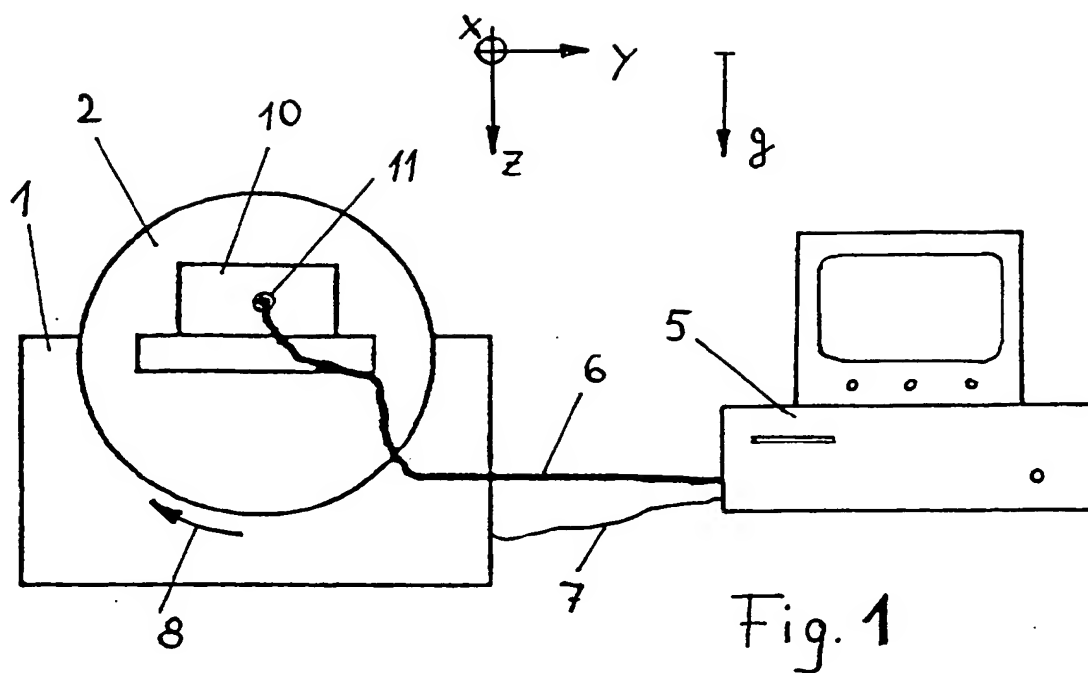
5 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 dadurch gekennzeichnet, daß das Meßsystem (10) im Ruhezustand einem Temperaturzyklus unterworfen wird, daß die Meßwerte der Winkelgeschwindigkeitssensoren als temperaturabhängige Winkelgeschwindigkeitsoffsets in einer ω -Temperatur-Tabelle (27) zusammen mit der zugehörigen Temperatur ϑ abgelegt werden, daß temperaturabhängige Meßwerte der Beschleunigungssensoren in einer B-Temperatur-Tabelle (35) abgelegt werden und daß für jeden Beschleunigungssensor aus den abgelegten temperaturabhängigen Meßwerten ($a_x(\vartheta)$, $a_y(\vartheta)$, $a_z(\vartheta)$) sowie aus den Meßwerten (a_{nx} , a_{ny} , a_{nz}) in Lotrichtung und in der inversen Lotrichtung temperaturabhängige Beschleunigungsoffsets bestimmt und in einer B-Offset-Temperatur-Tabelle (37) abgelegt werden.

7. Verfahren nach Anspruch 6 dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich die Meßwerte der Winkelgeschwindigkeits- und der Beschleunigungssensoren um die in den Tabellen (27, 37) gespeicherten Winkelgeschwindigkeits- und Beschleunigungsoffsets in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ korrigiert werden.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Kompensation der Meßwerte mit den in den Speichern (24, 33) abgelegten Kompensationsmatrizen (K^{-1} , K_ω^{-1}) vorgenommen wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß zur Berechnung der Koeffizienten des linearen Gleichungssystems bei einer mehr als einer erforderlichen Anzahl vorhandener Meßwerte lineare Regressionsrechenverfahren verwendet werden.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen



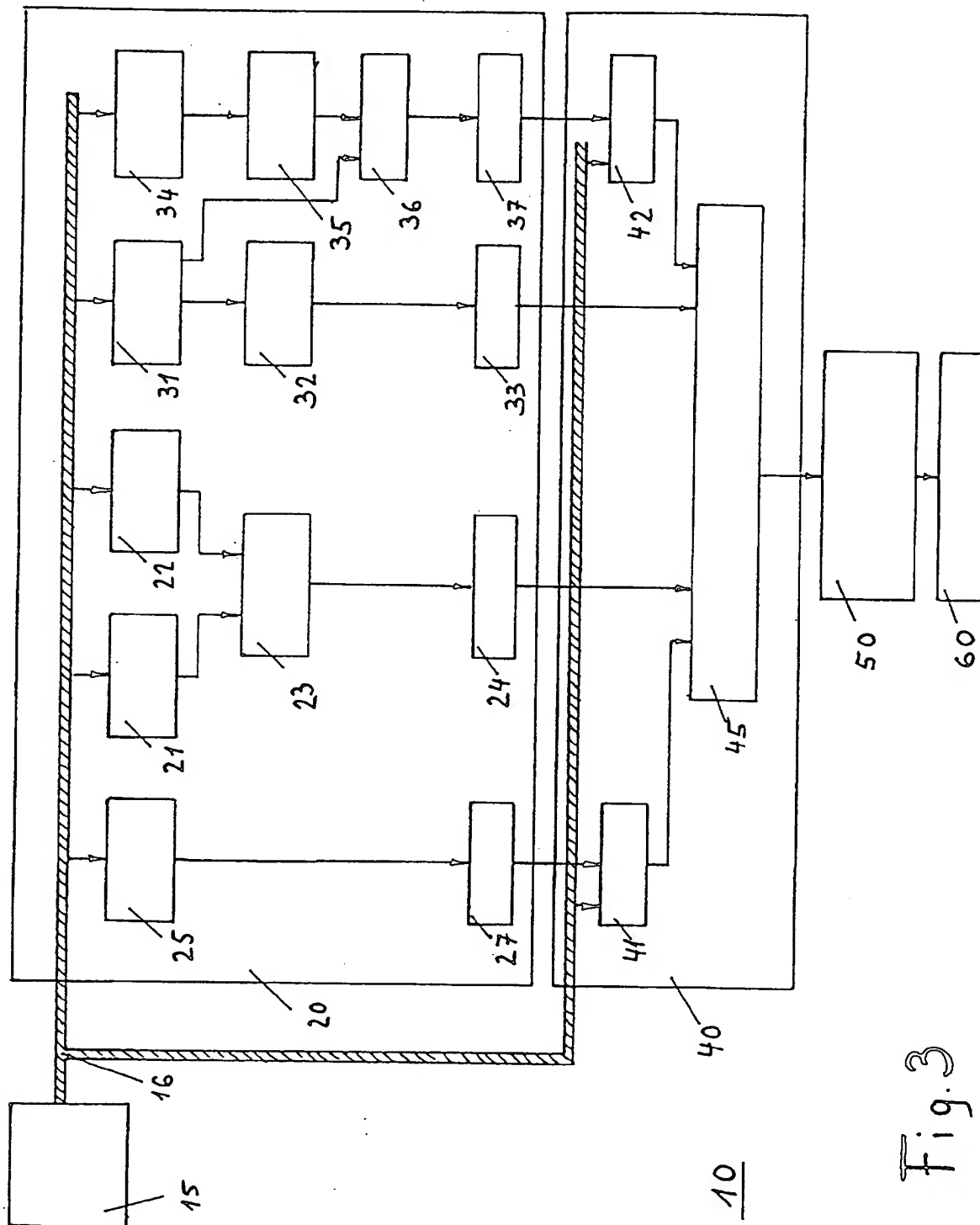


Fig. 3